

Министерство образования и науки РФ

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

УДК

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

\_\_\_\_\_ Кружаев В.В.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013

## ОТЧЕТ

### О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках выполнения п.1.2.2.3 Плана реализации мероприятий Программы развития УрФУ  
на 2013 год

#### ПО ТЕМЕ:

исследования открытых кандидатов в транзитные экзопланеты по результатам фотометриче-  
ских и спектроскопических наблюдений на телескопах Коуровской астрономической обсер-  
ватории УрФУ

(Заключительный)

Зав. кафедрой астрономии  
и геодезии ИЕН УрФУ,  
д.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Научный руководитель

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Исполнитель

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Екатеринбург 2013

## РЕФЕРАТ

1 ФИО автора: Бурданов Артем Юрьевич (Burdanov Artem Yurevich)

2 Аннотация: в работе представлены результаты дополнительных наблюдений двух кандидатов в транзитные экзопланеты, открытых в созвездии Лебедя в ходе пилотного фотометрического обзора неба, выполненного в Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета в 2012 году. Дополнительные наблюдения, проведенные с помощью телескопа МАСТЕР-Урал и 1.2-метрового телескопа Коуровской астрономической обсерватории, позволили уточнить характеристики систем: периоды орбитального обращения найденных кандидатов в экзопланеты и наклонения их орбит, отношение радиусов родительских звезд и кандидатов в экзопланеты, а также спектральные классы родительских звезд.

Follow-up observations` results of two transiting exoplanet candidates discovered in the Cygnus during a pilot photometric sky survey performed in Kourovka astronomical observatory of Ural Federal University in 2012 are presented. Follow-up observations were conducted with the MASTER Ural telescope and 1.2 -meter telescope of Kourovka astronomical observatory. Observations allowed determining properties of the systems more precisely: the orbital periods of exoplanet candidates, inclinations of their orbits, the ratio of the radii of the parent stars and exoplanet candidates, and the spectral classes of the parent stars.

3 Ключевые слова: экзопланета, метод транзитов, фотометрия, спектроскопия (exoplanet, transit method, photometry, spectroscopy).

4 Тема отчета: исследования открытых кандидатов в транзитные экзопланеты по результатам фотометрических и спектроскопических наблюдений на телескопах Коуровской астрономической обсерватории УрФУ (Research of discovered transiting exoplanet candidates by means of photometric and spectroscopic observations using telescopes of Kourovka astronomical observatory of UrFU).

## СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	7
1 Кандидаты в экзопланеты.....	7
2 Дополнительные фотометрические наблюдения .....	8
3 Спектроскопические наблюдения.....	11
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	13
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ.....	14

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

UrFU / УрФУ	– Ural Federal University / Уральский федеральный университет
MASTER / МАСТЕР	– Mobile Astronomical System of the Telescope-Robots / Мобильная астрономическая сеть телескопов-роботов
CCD / ПЗС	– Charge Coupled Device / Прибор с зарядовой связью
WASP	– Wide Angle Search for Planets / Широкопольный поиск планет
КАО	– Коуровская астрономическая обсерватория
BLS	– Box-fitting Least Squares

## ВВЕДЕНИЕ

По состоянию на начало октября 2013 г. открыто уже более 900 экзопланет – планет, которые обращаются вокруг звезд за пределами Солнечной системы. 387 из открытых внесолнечных планет являются транзитными [1]. В случае транзитных экзопланет родительская звезда, экзопланета и наблюдатель расположены таким образом, что для наблюдателя на Земле периодически происходит как прохождение экзопланеты по диску родительской звезды (транзит), так и ее покрытие звездой. Иллюстрация геометрической конфигурации показана на рисунке 1 [2]. Как следствие, можно регистрировать изменение потока излучения  $F$  от родительской звезды.

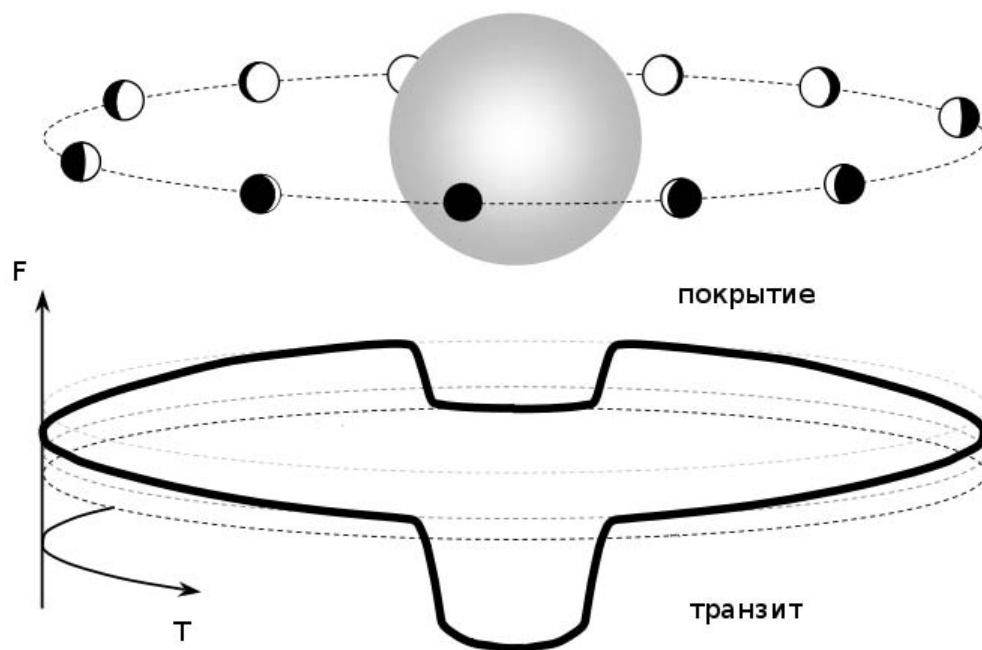


Рисунок 1 – Геометрическая конфигурация экзопланеты, родительской звезды и наблюдателя в случае транзита и покрытия [2]

Метод регистрации изменения потока излучения  $F$  от родительской звезды во время транзита является эффективным методом обнаружения новых внесолнечных планет и исследования уже открытых. Данный метод является вторым по количеству открытых экзопланет после метода Доплера – спектрометрических измерений радиальных скоростей родительских звезд [1].

Изучение физических характеристик сотен экзопланетных систем, известных в настоящее время, выявило особенность – вопреки ожиданиям, ни одна из этих систем не оказалась похожа на Солнечную. Более того, огромный разброс значений основных величин, характеризующих различные планетные системы, поставил под сомнение все существующие теории образования и эволюции как Солнечной системы в целом, так и отдельных планет, входящих в ее состав. В связи с этим возникла острая необходимость выявления общих закономерностей, присущих как можно большему числу экзопланетных систем, что, в свою очередь, требует открытия новых, объектов данного типа.

С мая по август 2012 г. в КАО УрФУ проводились высокоточные ПЗС-наблюдения в рамках проекта по поиску новых транзитных экзопланет и переменных звезд. По результатам обзора было открыто 359 новых переменных звезд и 2 кандидата в транзитные экзопланеты MASTER-1 b и MASTER-2 b. На данный момент эти объекты являются единственными кандидатами в экзопланеты, открытыми в России. Исходя из данных за 2012 г., предположительно, периодические падения потока излучения родительских звезд могут быть вызваны транзитами экзопланет с радиусом в 1/10 от радиуса родительских звезд и обращающихся с периодами менее суток. Это соответствует наиболее часто встречаемым планетным системам с «горячим юпитером» (например, WASP-18 b, WASP-19 b, WASP-43 b) [3].

Для исследования найденных кандидатов необходимы дальнейшие фотометрические и спектроскопические наблюдения. Уточненные данные позволят подготовить заявки на наблюдения на крупных телескопах, которые способны получить высокоточные кривые блеска, а также спектры высокого разрешения найденных кандидатов. Все это поможет определить параметры найденных систем и сделать выводы об их планетной природе.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 1 Кандидаты в экзопланеты

Родительская звезда кандидата MASTER-1 b имеет координаты  $RA = 20^h 26^m 02^s.13$ ,  $Dec = 50^\circ 06' 03.2''$  (J2000), блеск  $J = 11^m.40$ ,  $H = 11^m.05$  и  $Ks = 10^m.88$  согласно каталогу 2MASS [4] и  $V = 12^m.74$ ,  $R = 12^m.43$ , определенный по наблюдениям на телескопе МАСТЕР-Урал [3]. Приблизительный спектральный класс объекта оценен как G0-M8 с помощью работы [5]. Основные характеристики системы: орбитальный период затмевающего тела  $P = 0^d.846822$ , момент середины первого минимума  $T_0 = 2456062.81719$ , отношение радиусов затмевающего тела и центральной звезды  $R_p/R^* = 0.12$ , отношение длины большой полуоси орбиты затмевающего тела к радиусу звезды  $a/R^* = 3.1$ , угол наклона плоскости орбиты затмевающего тела к лучу зрения  $i = 75^\circ$ . Фазовая кривая MASTER-1 b представлена на рис. 2.

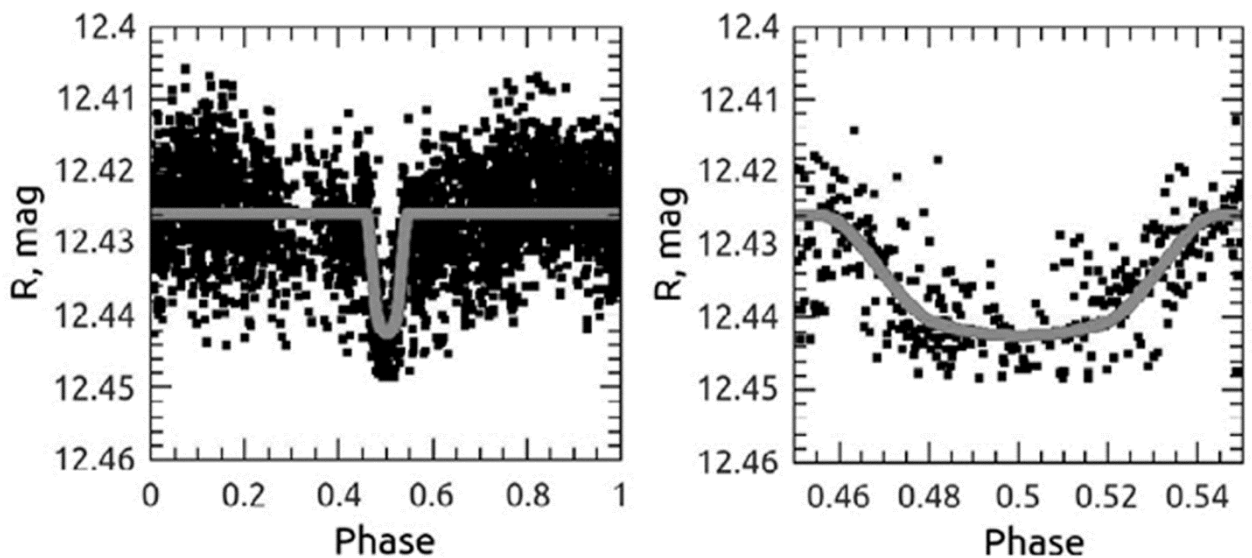


Рисунок 2 – Фазовая кривая MASTER-1 b.

Фазовая кривая объекта MASTER-2 b представлена на рис. 3. Кандидат имеет координаты  $RA = 20^h 34^m 16^s.25$ ,  $Dec = 50^\circ 15' 42.7''$  (J2000), звездные величины  $J = 12^m.60$ ,  $H = 12^m.21$  и  $Ks = 12^m.10$  согласно каталогу 2MASS [4] и  $V = 14^m.3$ ,  $R = 13^m.86$ , определенные по наблюдениям. Спектральный класс объекта оценивается как G8-K5 [5], основные параметры системы:  $P = 0^d.983316$ ,  $T_0 = 2456062.96155$ ,  $R_p/R^* = 0.12$ ,  $a/R^* = 4.9$ ,  $i = 87^\circ$ .

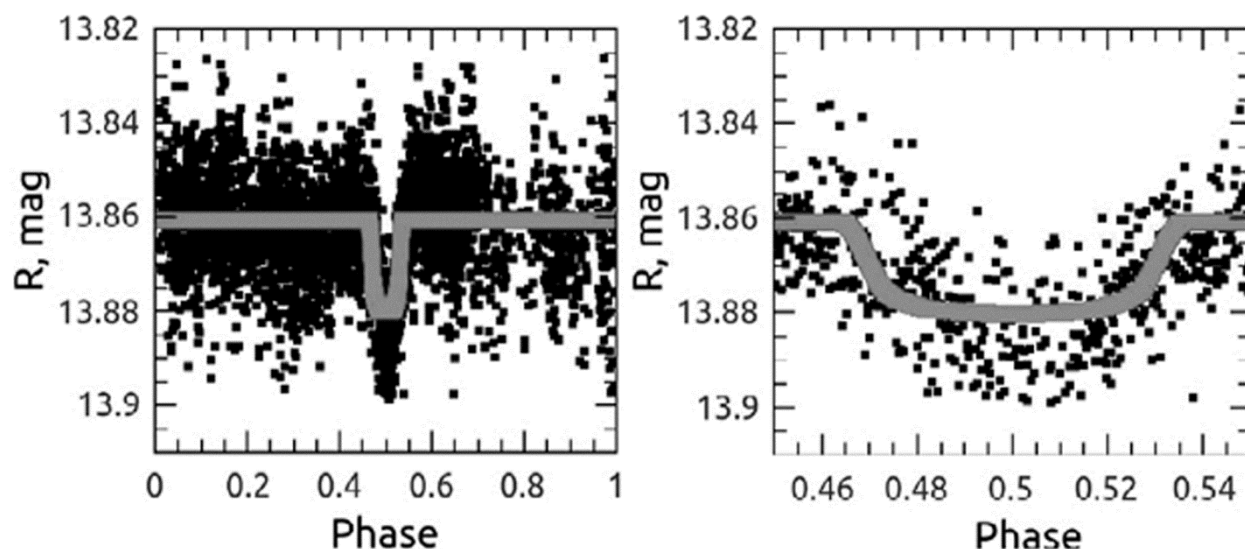


Рисунок 3 – Фазовая кривая MASTER-2 b.

## 2 Дополнительные фотометрические наблюдения

В целях более подробного изучения обнаруженных объектов в период 07.2013 / 10.2013 были запланированы фотометрические наблюдения кандидатов в экзопланеты в стадии транзита на телескопе МАСТЕР-Урал КАО УрФУ. Инструмент представляет собой систему из двух одинаковых катадиоптрических телескопов системы Гамильтона с диаметром объектива 400 мм и фокусным расстоянием объектива 1000 мм. Каждая труба снабжена устройством автофокусировки, набором светофильтров, соответствующих фотометрической системе Джонсона-Козинса, а также ПЗС-приемником Arogee Alta U16 с прямой засветкой и антиблумингом, имеющим размер  $4096 \times 4096$  пикселей. Конструкция телескопа укреплена на экваториальной монтировке NTM-500 фирмы Astelco и позволяет получать снимки звездного поля площадью  $2^\circ \times 2^\circ$  с масштабом  $1.85''/\text{пиксель}$  [6].

Фотометрические наблюдения транзитов были проведены в фильтрах V и R. Наблюдения MASTER-1 b были выполнены 22.07.2013 и 19.08.2013, MASTER-2 b – 04.08.2013. Данные о наблюдениях приведены в таблице 1.

Предварительная обработка данных включала в себя учет темновых кадров и кадров плоского поля, после чего выполнялась астрометрическая редукция с помощью программы «Astrometry.net» [7]. Дальнейшая фотометрическая обработка кадров выполнялась с применением программного пакета IRAF [8]; с целью увеличения точности фотометрии оценка среднего значения уровня фона и FWHM проводилась для каждого кадра индивидуально, полученные значения использовались для проведения высокоточной апертурной фотометрии. Фотометрическая постобработка выполнялась с помощью разработанной программы



Astrokit, реализующую дифференциальную фотометрию с помощью ансамблей звезд сравнения. Данный алгоритм позволяет устранять эффекты, связанные с вариациями прозрачности атмосферы в пределах кадра.

Таблица 1 – Условия наблюдений транзитов MASTER-1 b и MASTER-2 b на телескопе МАСТЕР-Урал КАО УрФУ

Дата	Объект	Количество кадров в фильтре R	Количество кадров в фильтре V	Экспозиция, с
22.07.2013	MASTER-1 b	57	58	120
19.08.2013	MASTER-1 b	139	137	120
04.08.2013	MASTER-2 b	89	91	120

Дальнейшая обработка представляла собой объединение полученных данных с результатами фотометрического обзора, выполненного в 2012 г. в КАО УрФУ. Выполнялся повторный поиск периодических падений блеска у объектов методом BLS [9], реализованным в программном пакете VARTOOLS [10]. Моделирование транзитов выполнялось с помощью модели, описанной в работе Mandel и Agol [11], также реализованной в программе VARTOOLS.

На рисунке 4 приведены кривые блеска, полученные по данным наблюдений транзита MASTER-1 b от 22.07.2013 в фильтрах V и R. Обе кривые показывают падение блеска порядка  $0^m.02$ , что подтверждает наличие транзита. Фактическая середина транзита приходится на юлианскую дату 2456496.34647, что отличается от теоретически предсказанной даты минимума по данным за 2012 г. на 60 минут.

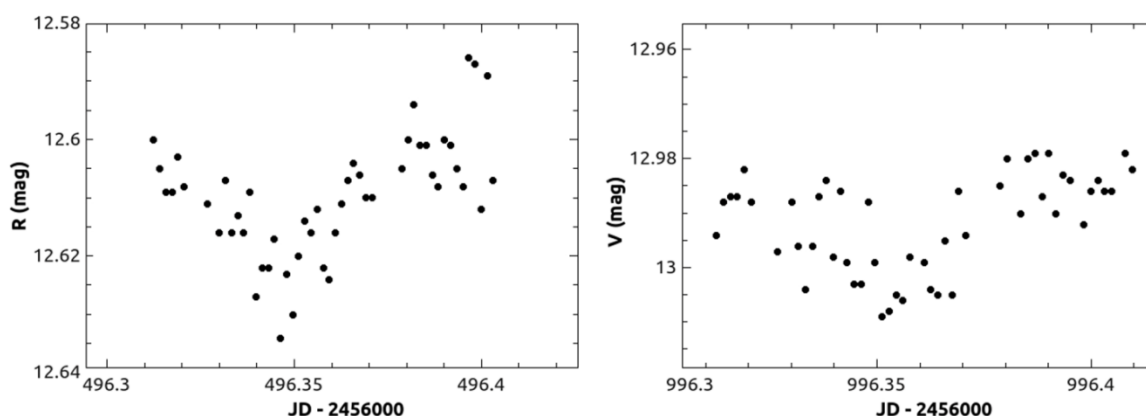


Рисунок 4 – Кривые блеска MASTER-1 b по данным наблюдений от 22.07.2013.

Рисунок 5 демонстрирует кривые блеска в фильтрах V и R, построенные на основе результатов наблюдений транзита MASTER-1 b от 19.08.2013.

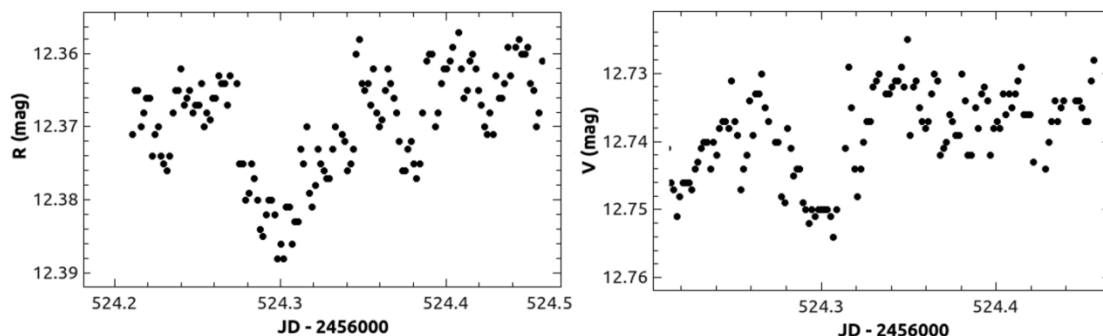


Рисунок 5 – Кривые блеска MASTER-1 b по данным наблюдений от 19.08.2013.

Обе кривые также демонстрируют падение блеска порядка  $0^m.02$ . Фактическая середина транзита приходится на юлианскую дату 2456524.30012, что отличается от теоретически предсказанной даты минимума по данным за 2012 г. на 50 минут.

С учетом полученных данных начальный период MASTER-1 b, равный  $0^d.846822$ , был пересчитан и составил  $0^d.846764$ . Момент середины первого минимума  $T_0 = 2456062.82157$ , отношение радиусов затмевающего тела и центральной звезды  $R_p/R^* = 0.2$ , отношение длины большой полуоси орбиты затмевающего тела к радиусу звезды  $a/R^* = 2.2$ , угол наклона плоскости орбиты затмевающего тела к лучу зрения  $i = 62^\circ$ .

Ввиду неудовлетворительных погодных условий, на сегодняшний день удалось провести лишь одно неполное наблюдение транзита MASTER-2 b. Тем не менее, полученные данные также позволили уточнить период: начальное значение  $0^d.983316$  исправлено на 10 секунд и в данный момент составляет  $0^d.983430$ , момент середины первого минимума  $T_0 = 2456062.94712$ . Кривая блеска половины транзита, полученная в фильтре R 04.08.2013, представлена на рисунке 6.

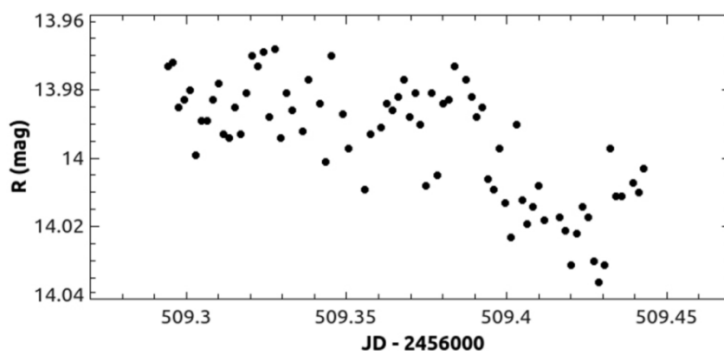


Рисунок 6 – Кривая блеска MASTER-2 b по данным наблюдений от 04.08.2013.

### 3 Спектроскопические наблюдения

Приблизительные спектральные классы звезд MASTER-1 и MASTER-2 оценены по показателям цвета как G0-M8 и G8-K5 соответственно с помощью работы [5]. Для их уточнения 29.05.2013 были проведены спектральные наблюдения родительских звезд с помощью целевого подвешного спектрографа низкого разрешения ANNA (дисперсия  $\sim 2.8 \text{ \AA/пиксель}$ , спектральное разрешение  $R \sim 600$ ), установленного в правом фокусе Нэсмита 1.2-метрового телескопа КАО УрФУ.

В ходе работы были получены спектры родительских звезд кандидатов, кадры лампы плоского поля и калибровочные кадры торий-аргоновой лампы. Обработка полученных длиннощелевых спектров проводилась в пакете IRAF процедурами задания DOSLIT для создания кадра плоского поля и задания APALL для калибровки длин волн и экстракции спектра [8].

Таким образом, по полученным данным спектральный класс MASTER-1 оценивается как G0-G8, MASTER-2 – M0-K8. Полученные спектры MASTER-1 и MASTER-2 представлены на рисунках 7 и 8 соответственно.

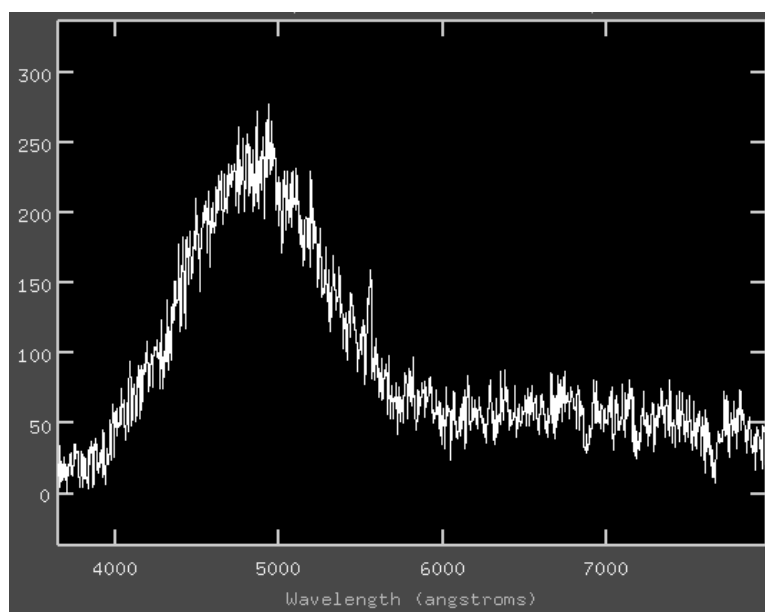


Рисунок 7 – Спектр MASTER-1 по данным наблюдений от 29.05.2013

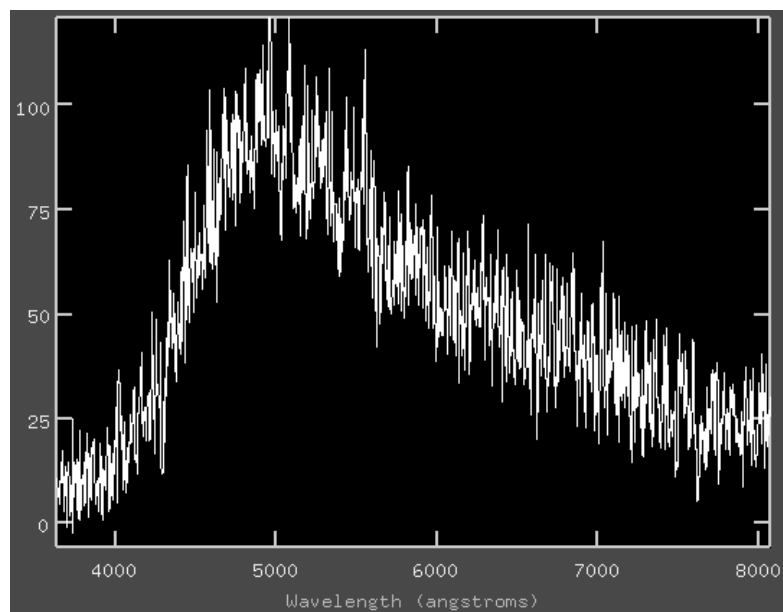


Рисунок 8 – Спектр MASTER-2 по данным наблюдений от 29.05.2013

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы проведены дополнительные фотометрические наблюдения транзитов кандидатов в экзопланеты MASTER-1 b и MASTER-2 b на телескопе МАСТЕР-Урал КАО УрФУ в фильтрах V и R. Наблюдения MASTER-1 b были выполнены 19.07.2013 и 22.08.2013, в результате которых получены транзитные кривые блеска. Фактические середины транзитов отличаются от теоретических моментов, предсказанных ранее, на 50-60 минут. По полученным данным был уточнен орбитальный период обращения кандидата, который составил  $0^d.846764$  и позволил уточнить эфемериды, которые уже используются для наблюдений объектов на более крупных телескопах. Момент середины первого минимума  $T_0$  составил 2456062.82157, отношение радиусов затмевающего тела и центральной звезды  $R_p/R^* = 0.2$ , отношение длины большой полуоси орбиты затмевающего тела к радиусу звезды  $a/R^* = 2.2$ , угол наклона плоскости орбиты затмевающего тела к лучу зрения  $i = 62^\circ$ .

Наблюдения MASTER-2 b были выполнены 04.08.2013, и ввиду погодных условий была получена лишь половина транзитной кривой блеска в фильтре R. Тем не менее, полученные данные также позволили уточнить орбитальный период обращения затмевающего тела: начальное значение  $0^d.983316$  исправлено на 10 секунд и в данный момент составляет  $0^d.983430$ ; момент середины первого минимума  $T_0 = 2456062.94712$ . По этим данным получены уточненные эфемериды, которые также используются для дополнительных наблюдений на крупных телескопах.

Для уточнения спектральных классов родительских звезд 29.05.2013 были проведены спектральные наблюдения с помощью щелевого подвешного спектрографа низкого разрешения ANNA, установленного в правом фокусе Нэсмита 1.2-метрового телескопа КАО УрФУ.

По полученным данным спектральный класс MASTER-1 оценивается как G0-G8, MASTER-2 – K0-K8.

Часть результатов работы опубликована в статье Иванов К.И., Бурданов А.Ю., Попов А.А., Крушинский В.В. Дополнительные фотометрические наблюдения кандидатов в транзитные экзопланеты MASTER-1b и MASTER-2b // Известия Иркутского государственного университета. –2013.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 The Extrasolar Planets Encyclopaedia [Электронный ресурс] URL: <http://exoplanet.eu/catalog.php> (дата обращения: 01.10.2013).
- 2 Perryman M. The Exoplanet Handbook. –Cambridge: Cambridge University Press, 2011. –P. 103.
- 3 Burdanov A., Popov A., Krushinsky V., Ivanov K. Two Transiting Exoplanet Candidates in Cygnus from the MASTER Project // *Peremennye Zvezdy (Variable Stars)*. 2013. V. 33, No. 2, P. 1-5.
- 4 Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R. et al. The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astronomical Journal*. –2006. –V. 131. –P. 1163–1183.
- 5 Pickles A. J. A Stellar Spectral Flux Library: 1150-25000 Å // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. –1998. –V. 110. –P. 863–878.
- 6 Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskoy E. et al. Master Robotic Net // *Ad. Ast.* –2010. –V. 2010, –P. 6.
- 7 Lang D., Hogg D., Mierle K. et al. Astrometry.net: Blind Astrometric Calibration of Arbitrary Astronomical Images // *The Astronomical Journal*. – 2010. – V. 139. – Iss. 5. - P. 1782–1800.
- 8 Tody D. The IRAF Data Reduction and Analysis System // *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series* / Ed. by Crawford D. L., 1986. –V. 627. –P. 733.
- 9 Kovács G., Zucker S., Mazeh T. A box-fitting algorithm in the search for periodic transits // *Astronomy and Astrophysics*. - 2002. –V. 391. – P. 369–377.
- 10 Hartman J., Gaudi B. et. al. Deep MMT Transit Survey of the Open Cluster M37. II. Variable Stars // *Astrophysical Journal*. – 2008. – V. 675. - Iss. 2. –P. 1254–1277.
- 11 Mandel K., Agol E. Analytic Light Curves for Planetary Transit Searches 2002 // *Astrophysical Journal*. – 2002. – V. 580. - Iss. 2. –P. L171–L175.